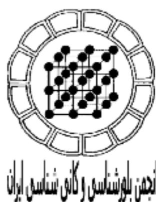
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و چهارم، شمارهٔ سوم، پاییز ۹۵، از صفحهٔ ۵۸۷ تا ۵۹۴



بررسی ناهمسانگردی مغناطیسی در میکروسیم‌های کبالت پایه

احمد امیرآبادیزاده*[1]، محمدرضا رسولی[1]، رضا مردانی[2]، رضا سرحدی[1]

۱- *آزمایشگاه تحقیقاتی مغناطیس و ابررسانایی، گروه فیزیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند*

۲- *دانشگاه صنعتی مالک اشتر شیراز*

(دریافت مقاله: ۹۴/۱۰/۱۶ ، نسخه نهایی: ۹۴/۱۲/۵)

چکیده: در این پژوهش، ناهمسانگردی مغناطیسی سیم کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور از مغناطیس سنج ارتعاشی برداری (VVSM) استفاده شد که می‌تواند مؤلفه‌های مغناطش در راستای طولی و عرضی را همزمان اندازه گیری کند. میدان مغناطیسی با زوایای مختلف نسبت به محور سیم اعمال شد و مغناطش، همزمان در دو راستای X و Y اندازه گیری شد. با افزایش زاویه‌ی اعمال میدان و راستای سیم، مؤلفه‌ی مغناطش در راستای X کاهش و برعکس مؤلفه‌ی مغناطش در راستای Y افزایش را نشان داد. نتایج به‌دست آمده، با توجه به ساختارهای مغناطیسی غیر معمول حوزه‌های سیم، توضیح داده شد.

واژه‌های کلیدی: *ناهمسانگردی مغناطیسی؛ ساختار میدان؛ سیم بی شکل کبالت پایه؛ مغناطیس سنج ارتعاشی برداری (VVSM).*

مقدمه

یکی از جالب‌ترین جنبه‌های فیزیک حالت جامد، ناهمسانگردی در مواد بلورین است. در مواد ناهمسانگرد یک خاصیت فیزیکی به راستای بلورنگاری ماده بلورین وابسته می‌شود [۱]. ناهمسانگردی در خواص اپتیکی (مثل ضریب شکست)، خواص الکتریکی (مثل چگالی جریان بحرانی در ابررساناهای دمای بالا) و خواص مغناطیسی مواد بلورین چه از لحاظ شناخت فیزیکی پدیده‌ها و چه کاربردی اهمیت می‌یابد [۲]. در این میان ناهمسانگردی مغناطیسی در مواد ناهمسانگرد، خاستگاه‌های متفاوتی از قبیل ناهمسانگردی شکل، ناهمسانگردی مغناطوالاستیک و ناهمسانگردی بلوری دارد. وجود این ناهمسانگردی‌ها باعث می‌شود که مواد بلورین دارای محور آسان و محور سخت مغناطش شوند که در راستای آسان، نمونه در میدان‌های کوچکتری به اشباع می‌رسد و در راستای سخت، اشباع در میدان‌های بزرگتری روی دهد [۳-۶].

انتظار می‌رود که برای موادی که نظم بلورین ندارند (مواد بی‌شکل) ناهمسانگردی بلوری وجود نداشته باشد، ولی میکروسیم‌های بی‌شکل کبالت پایه، ناهمسانگردی شدیدی از خود نشان می‌دهند [۷]. در حقیقت رفتار مغناطیسی غیر عادی این مواد مانند عدم تقارن در منحنی‌های مغناطوامپدانس غول آسا (GMI) [۸] به ناهمسانگردی مغناطیسی این مواد ربط داده می‌شود. خاستگاه این رفتار غیر معمول سوالی است که هنوز به‌طور کامل پاسخ داده نشده است. ساختار میدان‌های مغناطیسی در میکروسیم‌های بی شکل کبالت پایه از سوی تعدادی از پژوهندگان مورد بررسی قرار گرفته است. فریجئو و همکاران نشان دادند که در شرایط بازپخت مناسب، هسته‌ی سیم دارای جهت مغناطش محوری و پوسته‌ی اطراف آن دارای شرایط مغناطیسی دایره‌ای یا پیرامونی خواهد بود [۹].

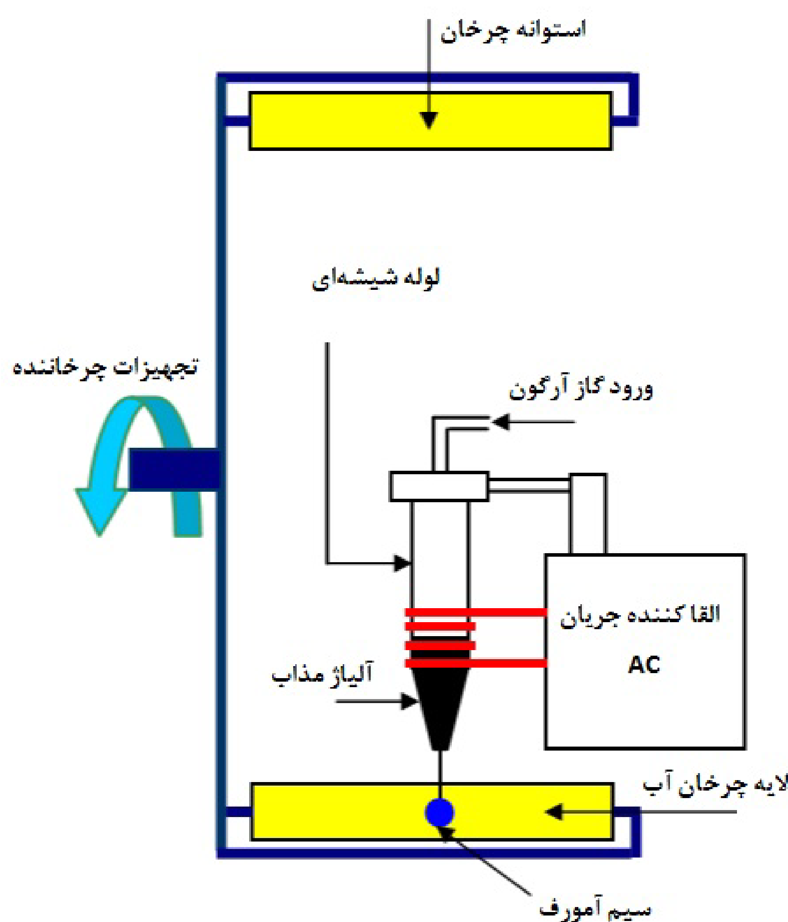
*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۵۶۳۲۲۰۲۲۴۵، پست الکترونیکی: aamirabadizade@birjand.ac.ir

بتانکورتو و همکاران به‌صورت نظری نشان دادند که تا میدان اعمال شده ۵۰ اورستدی در راستای موازی با محور سیم، کل بخش محوری در راستای میدان اعمال شده به اشباع می‌رسد. همچنین آن‌ها برای بخش‌های اطراف هسته مرکزی میدان‌های مغناطیسی دایره‌ای پیش بینی کردند [۱۰].

در این پژوهش با استفاده از تحلیل منحنی‌های پسماند مغناطیسی که با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی برداری (VVSM) به‌دست آمده است، سعی شده تا رفتار مغناطیسی سیم بی‌شکل $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ تفسیر شود. با استفاده از این مغناطیس سنج که قادر است میدان مغناطیسی را در یک راستای خاص اعمال کند و به‌طور همزمان مولفه‌های مغناطش را در راستای میدان اعمال شده (مثلا X) و راستای عمود بر آن (مثلا Y) اندازه‌گیری کند، قادریم به برخی از پرسش‌ها در مورد رفتار غیر عادی این سیم بی‌شکل پاسخ دهیم. بر اساس اطلاعات ما، برای اولین بار است که برای توضیح این رفتار غیرمعمول، از منحنی‌های پسماند VVSM استفاده می‌شود. بنابراین در این مقاله، به بررسی ناهمسانگردی مغناطیسی میکروسیم‌های بی‌شکل $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ پرداخته شده است.

بخش تجربی

سیم‌های مورد استفاده در این پژوهش به روش ذوب ریسی در آب در پژوهشکده‌ی جهاد دانشگاهی شریف، گروه مواد و فلزگری ساخته شده است در ساخت این سیم‌ها از Fe(99.98%)، Si(99.9%) و B(99.5%) ساخت شرکت Johnson Mathey و Co(99.8%) ساخت شرکت Chempur Feinchemlkalien استفاده شده است. شماتیکی از دستگاه مورد استفاده در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱ شماتیکی از روش ذوب ریسی در آب برای تولید سیم بی شکل.

در طول این فرآیند یک فوران سریع از فلز ذوب شده‌ی تزریقی، از داخل یک سوراخ کوارتزی به قطر ۸۰ تا ۲۰۰ میلی متر به داخل یک لایه سرد کننده‌ی مایع، که در اثر یک نیروی گریز از مرکز روی سطح داخلی یک استوانه‌ی دوار به قطر ۴۰۰ تا ۶۰۰ میلی متر قرار گرفته ایجاد خواهد شد. آهنگ سرد شدن سیم‌های به‌دست آمده با این روش در حدود $10^5\ {}^{k}\!/_{s}$ است. با این روش می‌توان سیم‌هایی با قطر بین ۸۰ تا ۱۶۰ میکرون ساخت [۱۱].

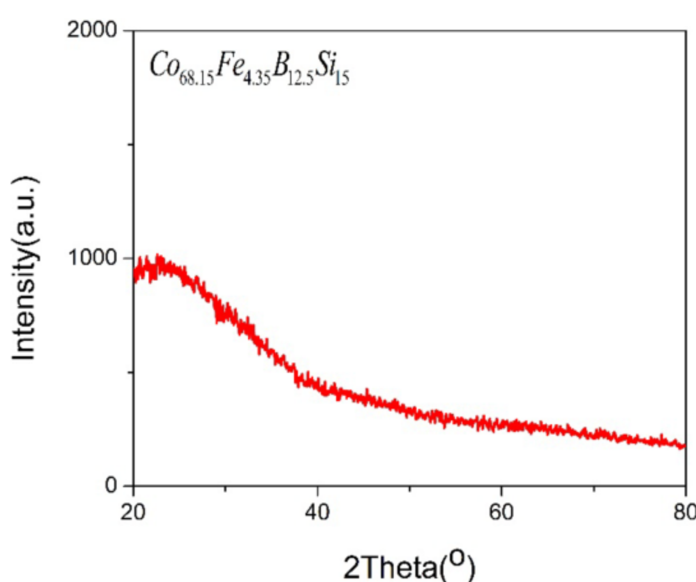
برای بررسی خواص مغناطیسی این نمونه از یک قطعه سیم بی‌شکل کبالت پایه به طول 5mm با ساختار $Co_{68.5}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ به قطر $125\mu m$ که به روش ذوب ریسی در آب ساخته شده استفاده شد. منحنی مغناطش بر حسب میدان در زوایای مختلف (۹۰، ۷۵، ۶۰، ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۰ = θ) که در آن θ زاویه‌ی بین راستای سیم و راستای اعمال میدان است، و نیز منحنی مغناطش بر حسب دما برای به‌دست آوردن دمای کوری نمونه، به‌وسیله‌ی مغناطیس‌سنج نمونه‌ی ارتعاشی (VSM) مدل Lakeshore 7400 اندازه گیری شد. کلیه اندازه گیری های وابسته به مغناطش و ناهمسانگردی در دمای اتاق انجام شد. دستگاه VSM برای اندازه‌گیری مغناطش با گلوله استاندارد و برای اندازه‌گیری‌های زاویه‌ای با یک ورقه نیکلی استاندارد زمینه‌بندی شدند.

بحث و برداشت

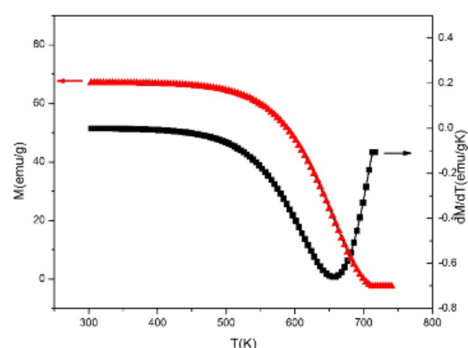
نخست از نمونه آنالیز XRD گرفته شد که نتایج در شکل ۲ آورده شده‌اند. چنانکه ملاحظه می شود، هیچ قله‌ای مبنی بر بلوری بودن نمونه در این طیف وجود ندارد.

یکی از پارامترهای با اهمیت مواد فرومغناطیسی دمای کوری آنهاست. روش‌های مختلفی برای تعیین دمای کوری یک نمونه فرومغناطیس وجود داشت که یکی از این روش‌ها، استفاده از منحنی گرادیان دمایی مغناطش بر حسب دما (منحنی dM/dH-T) است. منحنیM-T به همراه منحنی گرادیان دمایی مغناطش بر حسب دما در شکل ۳ نشان داده شده است. اندازه‌گیری‌ها در میدان۱۰۰۰ اورستد که در راستای محور سیم اعمال شده، انجام شد. با توجه به این منحنی دمای کوری نمونه در حدود $350\ {}^{o}C$ (۶۲۳K) برآورد شد.

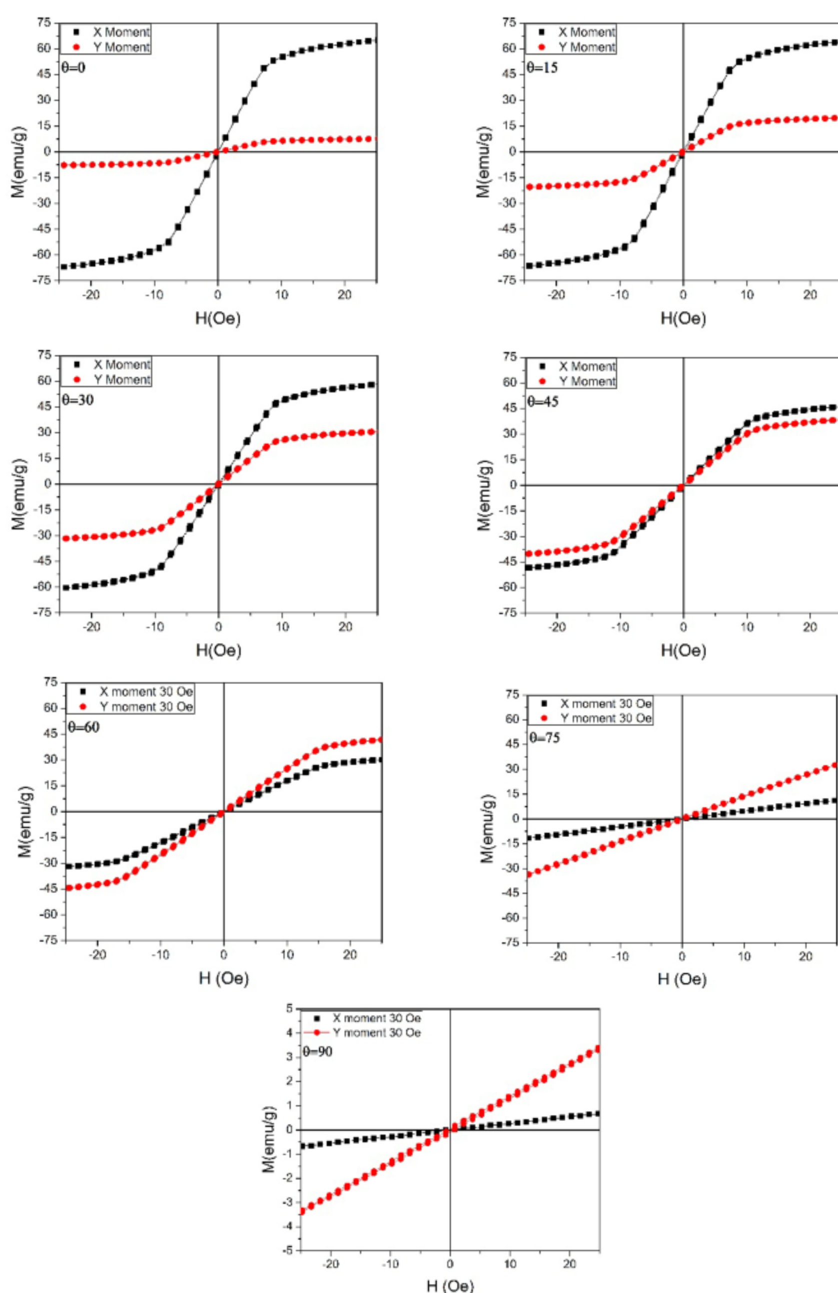
برای بررسی خواص مغناطیسی سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$، منحنی پسماند در زوایای مختلف (۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵، ۶۰، ۷۵ و ۹۰ درجه) در هر دو راستای X و Y اندازه گیری شده و نتایج در شکل ۴ نشان داده شده‌اند (سیم در راستای محور X قرار دارد و دستگاه مقدار مغناطش را در راستای X و Y اندازه گیری می‌کند). چنانکه ملاحظه می‌شود برای زوایای ۷۵ و۹۰ درجه، مغناطش به مقدار اشباع نمی‌رسد. به همین دلیل در بعضی از منحنی‌ها اطلاعات وابسته به این بخش آورده نشده است.



شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$



شکل ۳ منحنی M-T و $\frac{dM}{dT}-T$ سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$.



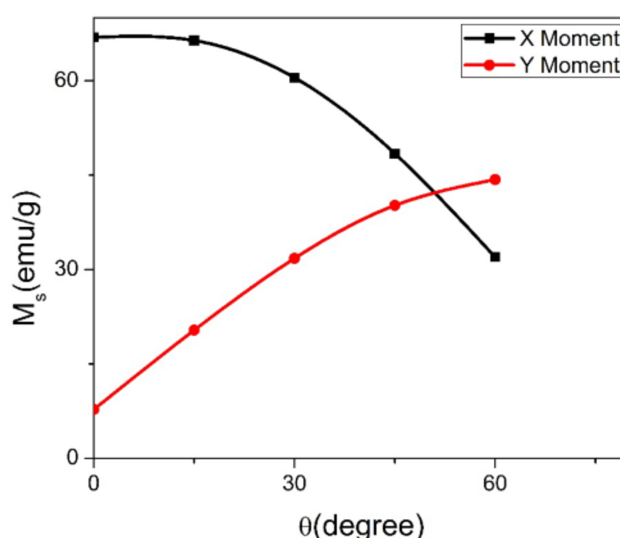
شکل۴ منحنی پسماند مغناطیسی در زوایای مختلف برای سیم بی شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ در دو راستا.

برای مقایسه‌ی بهتر پارامتر های مغناطیسی مربوط به سیم بی شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$ در زوایای مختلف این نتایج در جدول ۱ لیست شده‌اند. با توجه به نتایج نشان داده شده در جدول ۱، مشاهده می‌شود با افزایش زاویه اعمال میدان و راستای سیم، مؤلفه‌ی مغناطش اشباع (M_s) در راستای X کاهش و بر عکس مؤلفه مغناطش اشباع در راستای Y افزایش می‌یابد. این رفتار در شکل ۵ بهتر نشان داده شده است. از طرفی میدان وادارندگی، تغییرات کمی را در زوایای مختلف نشان می‌دهد که در زاویه‌ی ۴۵ درجه کمترین مقدار را دارد. تغییرات میدان وادارندگی بر حسب زاویه در شکل ۶ آورده شده است.

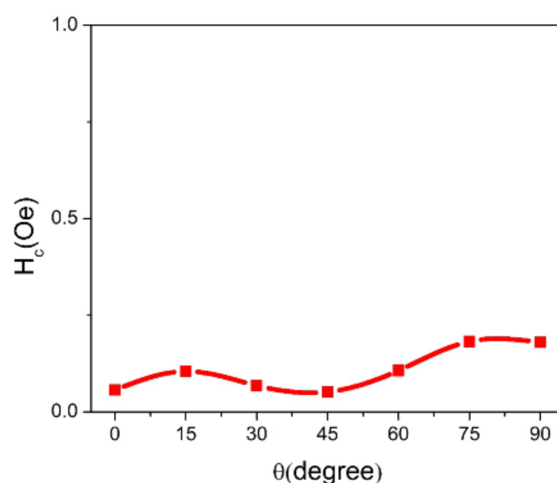
برای تفسیر نتایج فوق می‌توان گفت که سیم‌های بی‌شکل کبالت پایه، دارای دو ساختار میدان مغناطیسی محوری و پیرامونی هستند [۸-۱۰]. بنابراین با افزایش زاویه، میدان اعمال شده از راستای محور آسان دور و به محور آسان پیرامونی نزدیک می‌شود که این موجب کاهش مؤلفه‌ی مغناطش در راستای X و افزایش مؤلفه‌ی مغناطش در راستای Y می شود. در این سیم‌ها به‌دلیل نبود نظم بلوری و بی‌شکل بودن، ناهمسانگردی مغناطیسی بلوری وجود ندارد و ساختار میدان های مغناطیسی، حاصل ناهمسانگردی شکلی و ناهمسانگردی مغناطوکشسان است. این ناهمسانگردی مغناطوکشسان ناشی از گرادیان دمای بالای بین هسته و پوسته سیم بوده که طی سرد سازی ناگهانی سیم در آن ذخیره شده است [۱۲].

جدول ۱ پارامترهای مغناطیسی سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$.

زاویه (درجه)	مغناطش اشباع در راستای X (emu/g) M_{S_x}	مغناطش اشباع در راستای Y (emu/g) M_{S_y}	میدان وادارندگی H_c(Oe)	میدان ناهمسانگردی H_k(Oe)	$M_{s_x}(\theta)$ (emu/g)	مغناطش کل (emu/g) $\lvert M_s \rvert$
۰	۶۶/۹	۷/۸	۰/۰۵۷	۵/۲۸	۶۶/۹	۶۷/۴
۱۵	۶۶/۴	۲۰/۴	۰/۱۰۵	۵/۲۸	۶۴/۶	۶۹/۵
۳۰	۶۰/۵	۳۱/۸	۰/۰۶۸	۶/۷۸	۵۷/۹	۸۷/۶
۴۵	۴۸/۴	۴۰/۲	۰/۰۵۲	۸/۲۹	۴۷/۳	۸۸/۹
۶۰	۳۱/۹	۴۴/۳	۰/۱۰۶	۱۴/۲۸	۳۳/۴	۵۴/۶
۷۵	-	-	۰/۱۸۲	-	-	-
۹۰	-	-	۰/۱۸	-	-	-



شکل۵ منحنی‌های مغناطش اشباع بر حسب زاویه در دو راستا X و Y برای سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$.



شکل۶ منحنی میدان وادارندگی بر حسب زاویه برای سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$

با توجه به مطالب گفته شده، انتظار دو محور آسان، یکی در راستای محور سیم و دیگری در راستای پیرامونی اطراف پوسته سیم را داریم. وقتی میدان در راستای محور سیم اعمال می‌شود محور آسان بخش هسته‌ی سیم در راستای میدان بوده مقدار مغناطش اشباع در این راستا بیشینه (۶۶/۹ emu/g) بوده و مغناطش در راستای عمود بر محور سیم کمینه (emu/g ۷/۷۵) است.

برای بررسی تغییرات زاویه روی میدان ناهمسانگردی (میدانی که نمونه در زوایای مختلف به اشباع می‌رسد، H_k) منحنی dM/dH برای اولین ناحیه منحنی پسماند رسم و قله وابسته به تغییر شیب محاسبه شد، و نتایج آن در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. چنانکه مشاهده می‌شود با افزایش زاویه، مقدار میدانی که در آن سیم به اشباع می‌رسد (H_k) افزایش می‌یابد (شکل ۷) و چنانکه اشاره شد، می‌تواند به‌دلیل دور شدن میدان اعمال شده از محور آسان هسته سیم باشد.

سوالی که در اینجا مطرح می شود این است که کدام یک از این دو ناحیه، هسته یا پوسته‌ی دور آن، حجم بیشتری را اشغال می‌کند؟ فرض می‌کنیم بخش مرکزی حجم بیشتری را اشغال می‌کند. اگر این فرض درست باشد با دور شدن از محور آسان مغناطش اشباع در راستای X کاهش و مقدار آن در راستای Y افزایش خواهد یافت زیرا به راستای آسان حوزه‌های پیرامونی نزدیک می‌شویم. همچنین انتظار داریم مقدار مغناطش کل در زاویه‌ی ۴۵ درجه بیشینه و میدان وادارندگی کمینه مقدار را داشته باشد زیرا راستای میدان بین دو راستای آسان قرار می گیرد.

برای این منظور مقدار مغناطش اشباع کل که از رابطه‌ی ۲ محاسبه شده و در جدول ۱ آورده شده است.

$$|M_s| = \sqrt{M_{s_x}^2 + M_{s_y}^2} \qquad (۲)$$

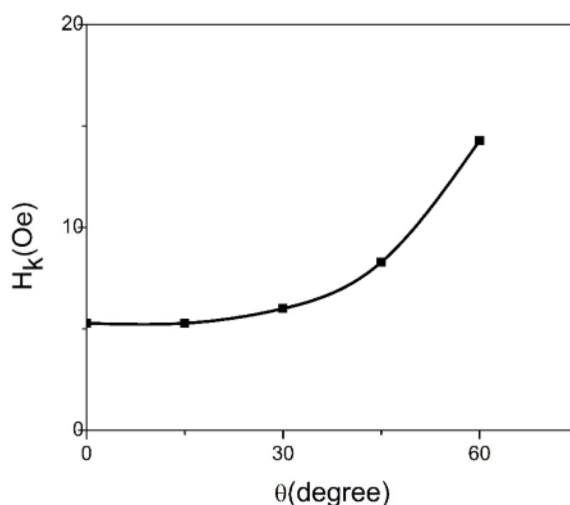
چنانکه ملاحظه می‌شود $|M_s|$ بیشترین مقدار را در زاویه‌ی ۴۵ درجه دارد.

در شکل ۸ مغناطش در راستای X بر حسب زاویه در میدان ۵۰ Oe تا زاویه ۱۸۰ درجه نشان داده شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که با چرخش سیم، مغناطش نیز چرخیده و به احتمال زیاد حجم حوزه‌های مرکزی از حوزه‌های پیرامونی بیشتر خواهد بود.

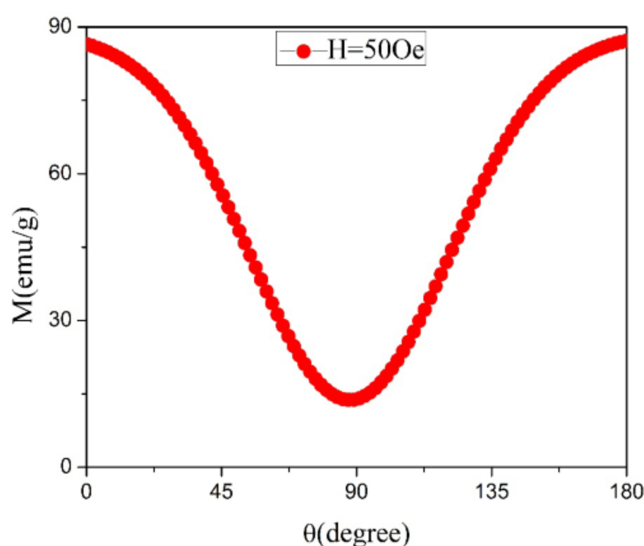
برای تایید این نتایج مؤلفه‌ی بردار مغناطش در راستای X برای زوایای مختلف با استفاده از رابطه‌ی ۳ محاسبه شد.

$$M_{S_x}(\theta) = M_{S_x(\theta=0)} \cos\theta \qquad (۳)$$

نتایج در جدول ۱ آورده شده‌اند که با توجه به نتایج بین این محاسبات و نتایج تجربی همخوانی خوبی وجود داشته و مقادیر $M_{S_x}(\theta)$ نزدیک به مقادیر M_{S_x} هستند. این رفتار به احتمال زیاد نشان‌دهنده این است که حجم ناحیه‌ی مرکزی میدان‌های مغناطیسی (محور استوانه) بیشتر از حجم میدان‌های مغناطیسی پیرامونی است. این نتیجه در آزمایش‌های مربوط به اندازه‌گیری مغناطو امپدانس غول آسا در بازپخت AC نیز تایید شده است [۱۳].



شکل۷ منحنی میدان ناهمسانگردی بر حسب زاویه برای سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$



شکل۸ منحنی مغناطش بر حسب زاویه در میدان ۵۰ Oe برای سیم بی‌شکل کبالت پایه‌ی $Co_{68.15}Fe_{4.35}B_{12.5}Si_{15}$

برداشت

در این پژوهش به بررسی ناهمسانگردی مغناطیسی درسیم بی شکل کبالت پایه پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهند به دلیل گرادیان دمای بالای موجود در سیم در مرحله سرد سازی ناگهانی، بخش هسته‌ی این سیم دارای ناهمسانگردی محوری و بخش پوسته‌ی این سیم دارای ناهمسانگردی پیرامونی است. نیروی وادارندگی و مغناطش کل در زاویه‌ی ۴۵ درجه به ترتیب کمترین و بیشترین مقدار خود را دارند. می‌توان گفت که حجم میدان‌های مرکزی این سیم بیشتر از حجم میدان‌های پیرامونی آن است.

مراجع

[1] Borchardt-Ott W., "*Crystallography*", Springer Verlag, (1993) 357 pages.

[۲] اخوان م.، یمنی ز.س.، "*پیشرفت های ابررسانایی دمای بالا*"، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۱.

[3] Skomskia R., Coey J.M.D., *"Magnetic anisotropy-How much is enough for a permanent magnet?"*, Scripta Materialia 112 (2016) 3-8.

[4] Nongjai R. Shakeel Khan, Hilal A., Imran Khan, Annapoorni S., Gautam S., Lin H.J; Chang F.H., Chae K.H., Asokan K., *"Modification of magnetic anisotropy induced by swift heavy ion*

[9] Freijo J. J.; Hernando A.; Vazquez M.; Mendez A., Ramanan V. R., *"Exchange biasing in ferromagnetic amorphous wires: A controllable micromagnetic configuration"*, Applied Physics Letters 74 (1999) 1305.

[10] Betancourt I., Hrkac G. and Schrefl T., *"Magnetic domain structure and magnetization reversal in amorphous microwires with circular anisotropy: A micromagnetic approach"*, J. Appl. Phys.109 (2011) 013902.

[11] Phan M. H., Peng H. X., *"Giant magneto impedance materials: Fundamentals and applications"*, Progress in Materials Science 53 (2008) 323-420.

[12] Amirabadizadeh A., Lotfollahi Z., Zelati A., *"Giant magnetoimpedance effect of $Co_{68.15}Fe_{4.35}Si_{12.5}B_{15}$ amorphous wire in the presence of magnetite ferrofluid",* J. Magn. Magn. Mater. (2015), http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.11.029 in press.

[13] A. Amirabadizadeh, R. Mardani, M. Ghanaatshoar, *"The effect of current frequency and magnetic field direction in alternative current-field annealing on the GMI and magnetic properties of Co-based wires",* Journal of Alloys and Compounds 661 (2016) 501-507.

irradiation in cobalt ferrite thin films", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 394 (2015) 432–438.

[5] Lisfi A., Williams C. M., Nguyen L. T., Lodder J. C., Coleman A., Corcoran H., Johnson A., Chang P., Kumar A. and Morgan W., *" Reorientation of magnetic anisotropy in epitaxial cobalt ferrite thin films",* Phys. Rev. B 76 (2007) 054405.

[۶] ایرانمنش پ.، تجبر ن.، رضایی رکن آبادی م.، فروشارت د.، پور آرین ف.، *"اثر جانشانی کبالت بر خواص مغناطوالاستیکی ترکیب $Nd_6Fe_{13}Cu$*، مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، شماره ۳ (۱۳۸۹) ص ۶۷-۷۴.

[7] Tiberto P., Vinai F., Rampado O., Chiriac H., Ovari T. A., *"Giant magnetoimpedance effect in melt-spun Co-based amorphous ribbons and wires with induced magnetic anisotropy",* Journal of Magnetism and Magnetic Materials 05 (1999) 388-390

[8] Mardani R., Amirabadizadeh A., Ghanaatshoar M., *"Angular dependencs of giant magneto impedance and magnetic charactristic of Co-based wire in diffrent magnetic field range",* Mod. Phys. Lett. B 28 (2014) 1450197-1450207.